# AORI金星大気GCMでみられる波動の発生 および東西平均流加速

\*山本 勝(九大応力研),廣瀬拓海(九大総理工), 池田 恒平(国立環境研), 高橋 正明(国立環境研), 佐藤 正樹(東大大気海洋研)

#### くはじめに>

Yamamoto et al. (2021, 2023)は、Ikeda (2011)によって開発された金星大気大循環モデル(GCM)に地形を組み込んだ数値実験を行い、エネルギー変換を基に熱潮汐波と短周期擾乱を議論した。

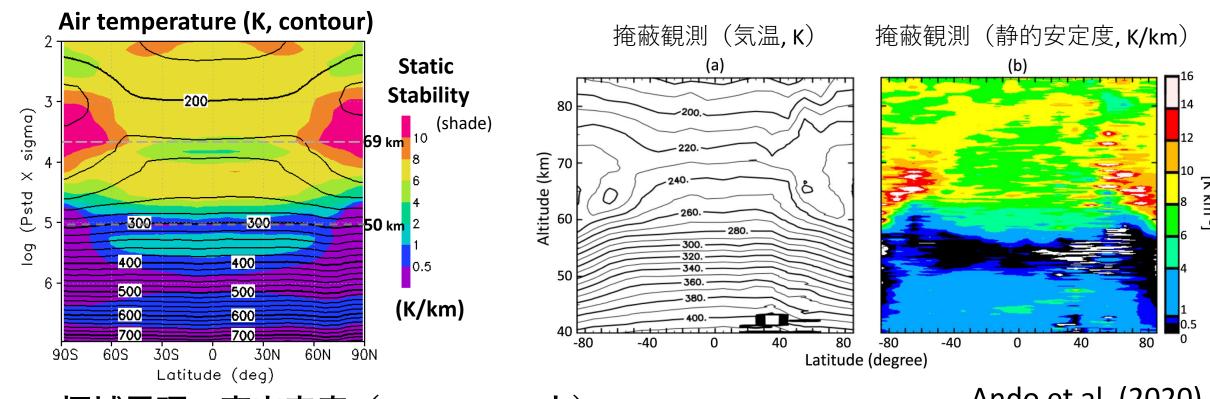
#### <モデルと解析方法>

東大大気海洋研のVenus GCMを用いてT63L52の解像度で行った実験結果を解析した.本研究では、熱潮汐波<del>と短周期擾乱</del>の回転成分と発散成分の構造を調べて、エネルギー変換に基づき、波の形成・維持や赤道風加速を調査した。

# 帯状平均構造(気温・安定度)の概要

モデル(Yamamoto et al., 2021)

#### 観測



高安定度(>10 K/km:赤)

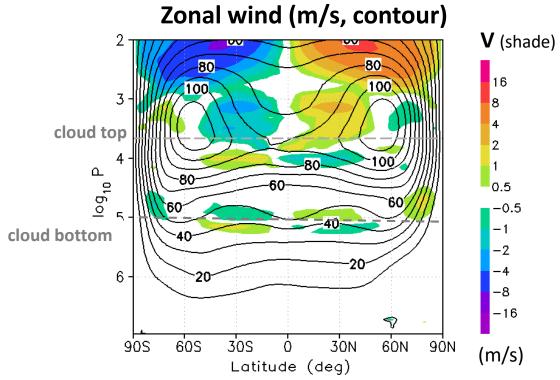
Ando et al. (2020)

極域雲底下 深い低安定度(<0.5 K/km:紫)

低中緯度雲底 薄い低安定層(~0.5 K/km:紫~青)

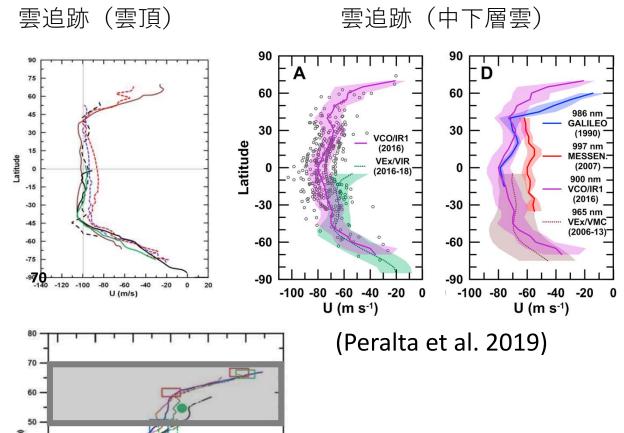
# 帯状平均構造(風)の概要





雲頂の東西風 90~100 m/s ⇒観測と同程度<sup>\*</sup>

中層雲の東西風 70~80 m/s 雲底の東西風 ~50 m/s →観測より弱い



プローブ

Westward Zonal Wind Velocity (m/s

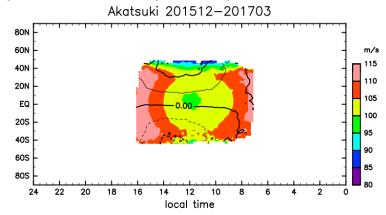
観測

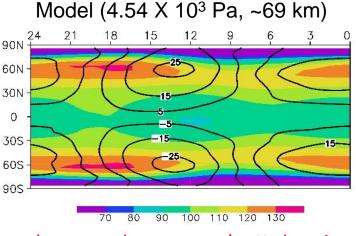
(Sanchez-Lavega et al. 2017)

#### 熱潮汐波の概要

#### Yamamoto et al. (2019) T21L52

u (m/s, shade) & v (m/s, contour)





東西風極小、南北極大



Yamamoto et al. (2021) T63L52

Kouyama et al. (2019)の温度場との 類似点

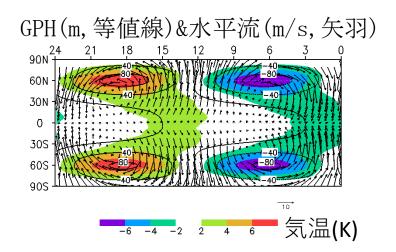
- ·LIRの一日潮:V構造。中緯度の 温度極大。一日潮の振幅。
- ・LIRの半日潮:重力波構造。

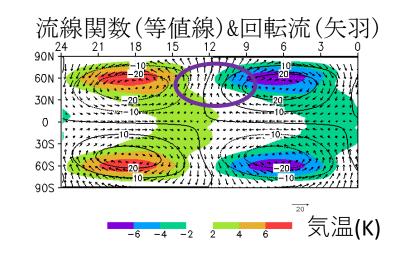
#### 相違点

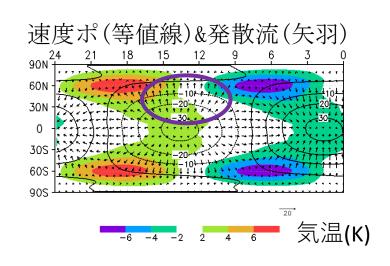
- ・GCMの半日潮の振幅は、観測より小さい。
- ・雲頂加熱極大高度では、 GCM の位相が観測より数時間ズレる。

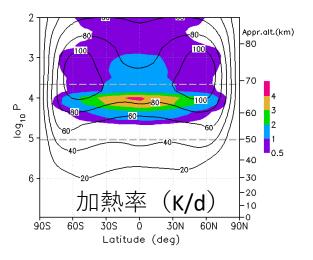
#### 一日熱潮汐の水平構造とエネルギー変換

〇水平構造(65km、太陽光加熱極大)







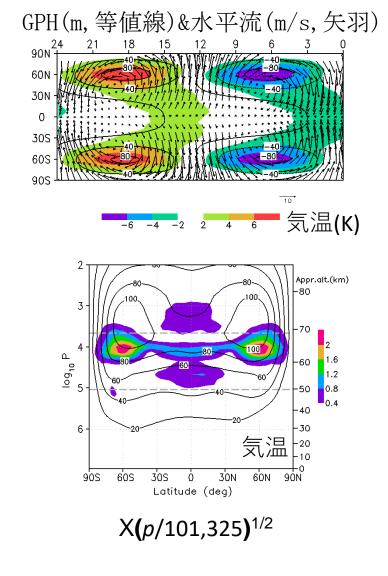


 $X(p/101,325)^{1/2}$ 

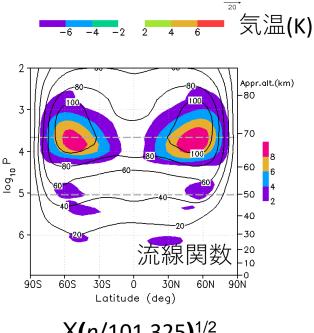
- ・高緯度でジオポテンシャルの極大。ロスビー波(流線関数)と赤道重力波(速度ポテンシャル)の足し合わせ
- ・中緯度の高温域で極向き⇒極向き熱輸送
- ・南北流の回転成分も発散成分のどちらも12時付近で極大 ⇒流線関数も速度ポテンシャルの極向き南北流が一致する ような配置

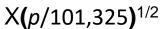
# 一日熱潮汐の水平構造とエネルギー変換

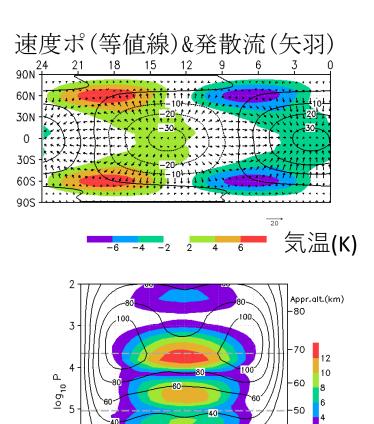
#### 〇水平構造(65km、太陽光加熱極大)



流線関数(等値線)&回転流(矢羽) 気温(K) Appr.alt.(km) log<sub>10</sub> P



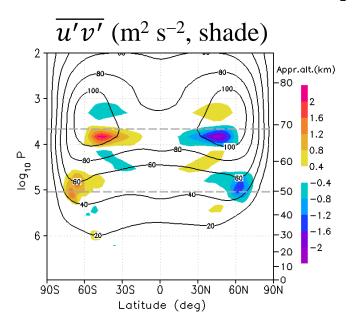


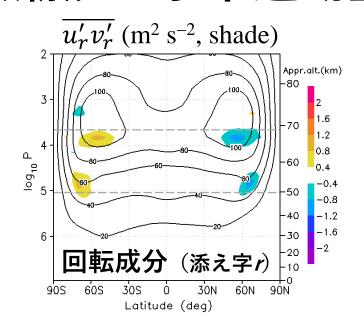


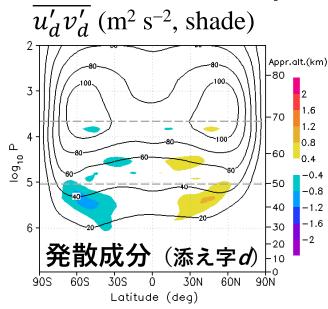
 $X(p/101,325)^{1/2}$ 

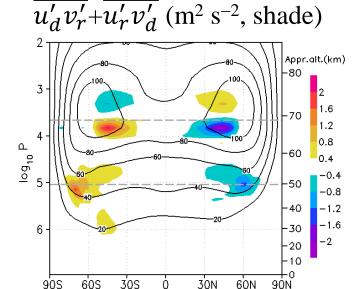
Latitude (deg)

X(p/101,325)







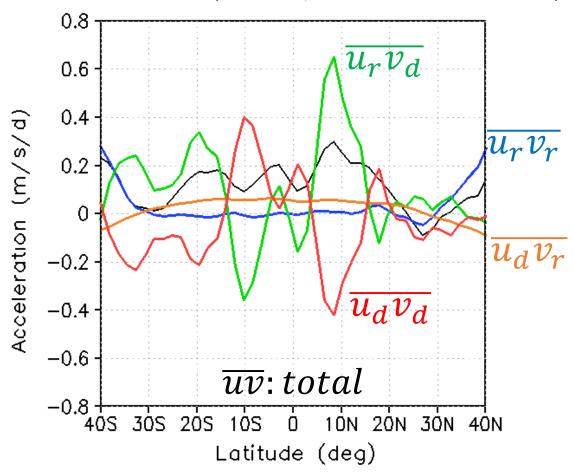


Latitude (deg)

- ・雲頂と雲底で赤道向き運動量フラックス
- ・太陽光加熱高度の上下で極向き運動量輸送。
- ⇒鉛直伝播する波が高緯度に広がる
- ・中高緯度では回転成分と発散成分の相関項による輸送が大きい

# 一日熱潮汐の水平運動量輸送(赤道域)

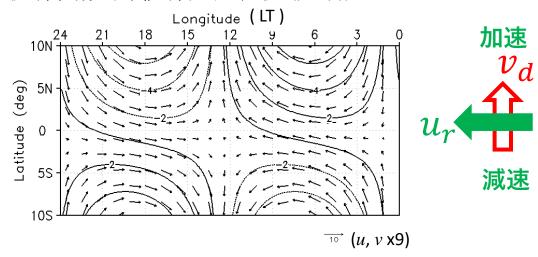
東西風加速(65km、太陽光加熱極大)



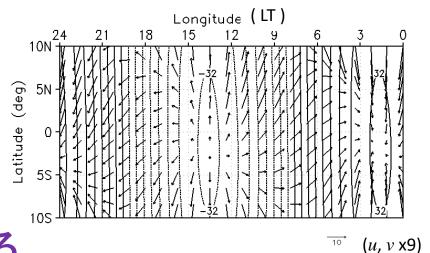
赤道で回転成分東西流 収束域が赤道の南

低緯度の加速機構 は赤道非対称になる

流線関数(等値線)&回転流(矢羽) 65km

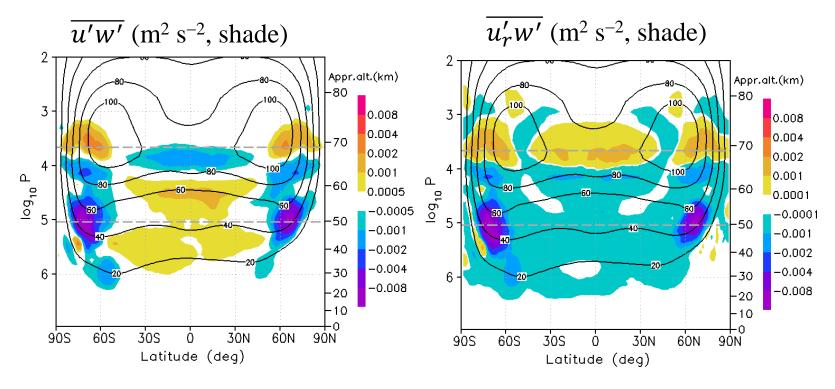


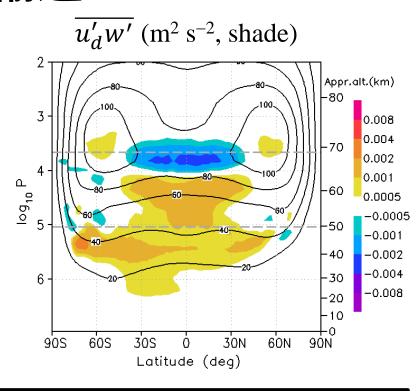
速度ポ(等値線)&発散流(矢羽) 65km





# 一日熱潮汐の鉛直運動量輸送





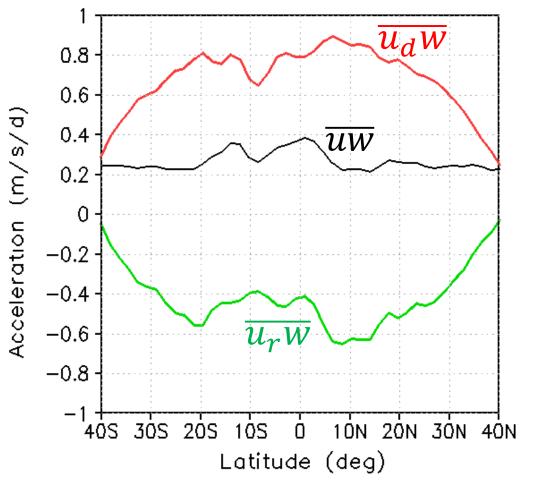
- ・低緯度では、太陽光加熱域から上下に鉛直伝播 高緯度では、鉛直伝播の向きが低緯度と反対
- ・低緯度のフラックスは、発散成分u<sub>d</sub>の寄与大 高緯度のフラックスは、回転成分u<sub>r</sub>の寄与大

低緯度では 発散成分 $\mathbf{u_d}$ の $\overline{u_d'w'}$ は 回転成分 $\mathbf{u_r}$ の $\overline{u_r'w'}$ と逆向き



#### 一日熱潮汐の鉛直運動量輸送(赤道)

東西風加速(65km、太陽光加熱極大)



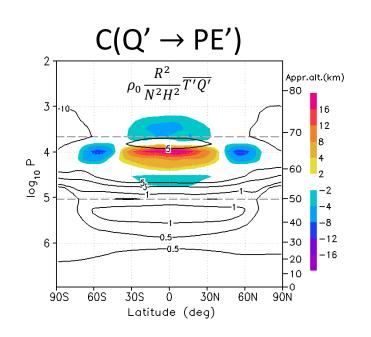
低緯度では

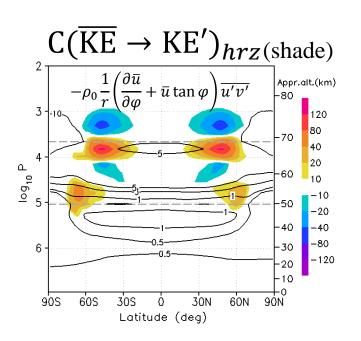
発散成分 $\mathbf{u_d}$ の $\overline{u_d'w'}$ は 回転成分 $\mathbf{u_r}$ の $\overline{u_r'w'}$ と逆向き

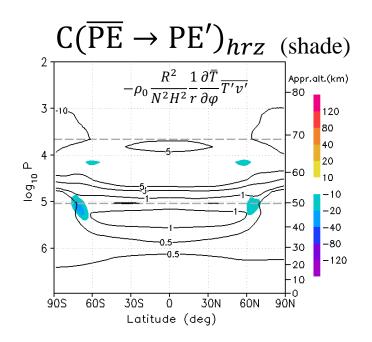


発散成分による東西風加速を回転成分による東西風減速で打ち消し、その残差が正味0.2m/s/d程度の加速になる

#### 一日熱潮汐の水平構造とエネルギー変換





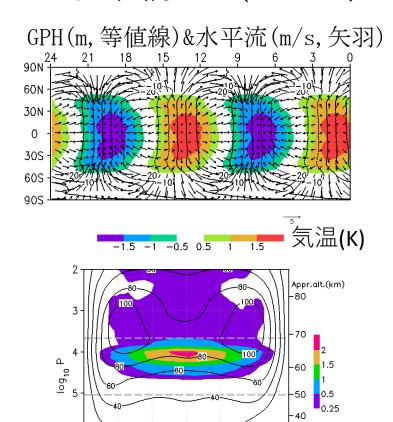


太陽光加熱の雲頂極大で、擾乱PEへエネルギー供給。

加熱の極大高度(10<sup>4</sup> Pa)と対流圏界面(10<sup>5</sup> Pa)で順圧変換 ⇒中高緯度のロスビー波のような熱潮汐構造は、 熱による強制だけでなく、順圧変換によって形成・維持される。

### 半日熱潮汐の水平構造とエネルギー変換

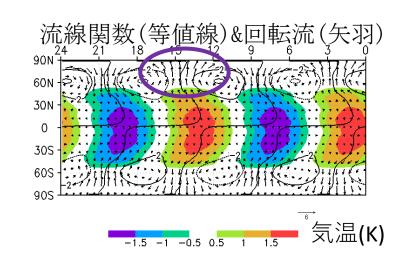
#### 〇水平構造(65km、太陽光加熱極大)

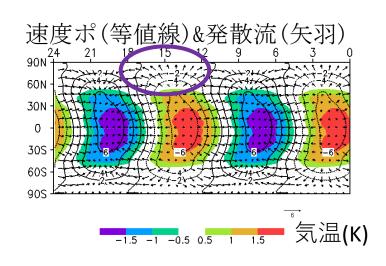


X(p/101,325)<sup>1/2</sup>

Latitude (deg)

(K/d)

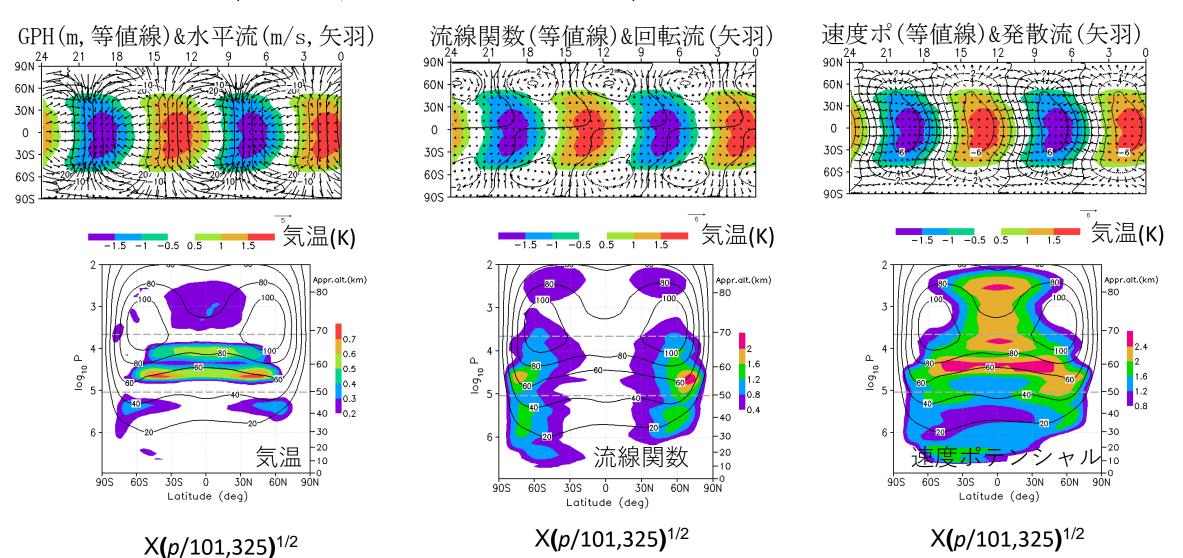




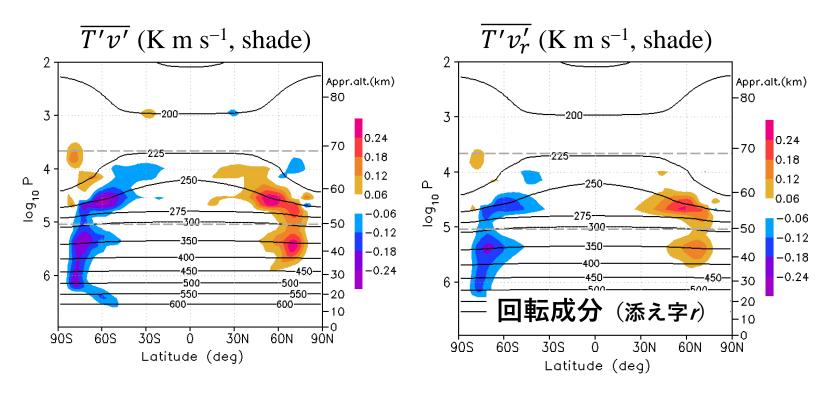
- ・中低緯度でジオポテンシャルの極大。ロスビー波(流線 関数)と重力波(速度ポテンシャル)の足し合わせ
- ・中緯度の高温域で極向き⇒極向き熱輸送
- ・水平流の回転成分も発散成分のどちらも14時付近で極大 ⇒流線関数も速度ポテンシャルの極向き南北流が一致する ような配置

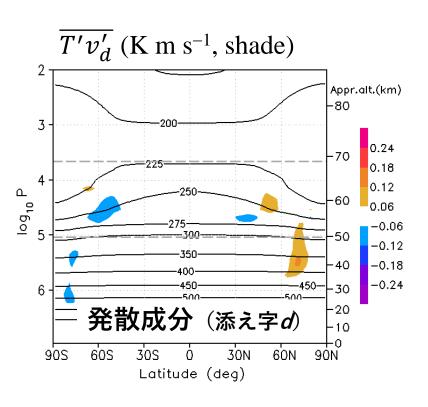
# 半日熱潮汐の水平構造とエネルギー変換

#### 〇水平構造(65km、太陽光加熱極大)



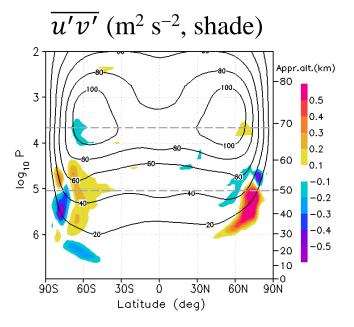
### 半日熱潮汐の水平熱輸送

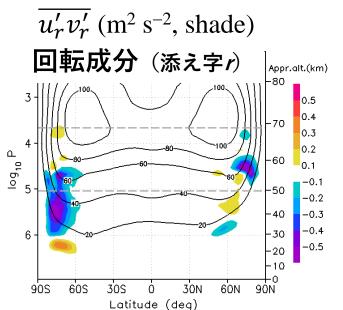


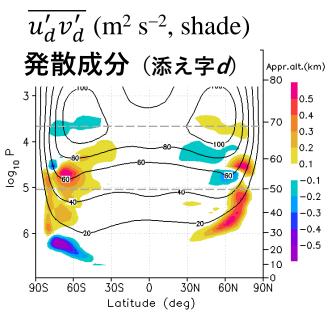


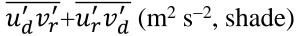
- ・高緯度の広い高度域で極向き熱輸送
- ・一日潮より小さい
- ・回転成分による熱輸送が支配的(一日潮と異なる)

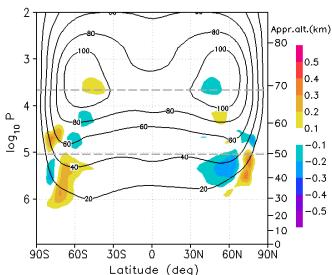
# 半日熱潮汐の水平運動量輸送









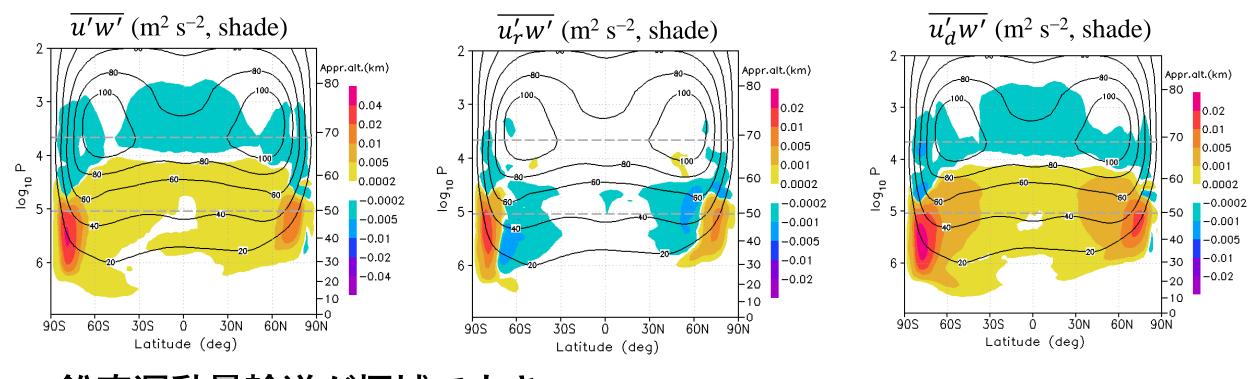


・赤道向き運動量輸送の寄与は小さい。

一日潮より小さく、南北非対称

半日潮の水平運動量フラックスは赤道域で小さく赤道超回転には寄与しない(図省略)

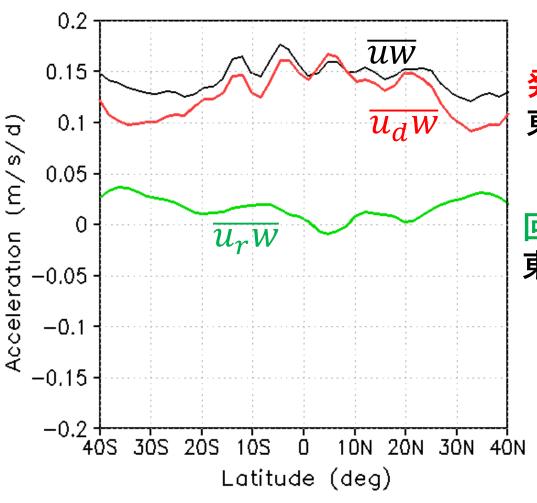
### 半日熱潮汐の鉛直運動量輸送



- ・鉛直運動量輸送が極域で大きい。フラックスの向きが変わる高度が、低緯度と高緯度で異なる。
- ・60度より低緯度では、発散成分u<sub>d</sub>の寄与大
- ・60度より高緯度では、回転成分と発散成分の両方の寄与大

#### 半日熱潮汐の鉛直運動量輸送(赤道)

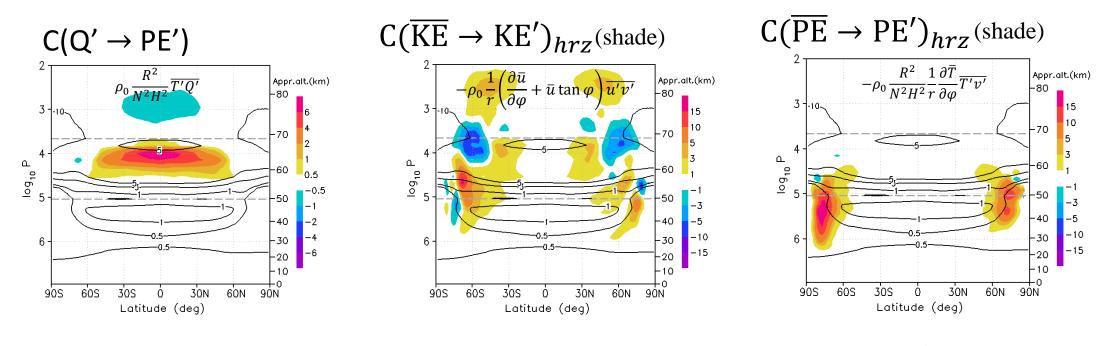
東西風加速(65km、太陽光加熱極大)



発散成分Udによるフラックスが 東西風加速を加速を生み出す。

回転成分Urによるフラックスが 東西風加速は正だが、弱い。

#### 半日熱潮汐の水平構造とエネルギー変換



雲頂の低緯度域で、太陽光加熱による擾乱PEエネルギー供給 太陽光加熱によるエネルギー供給域周辺の中高緯度域で順圧変換 加熱域から離れた雲底より下(10<sup>6</sup>−10<sup>5</sup> Pa)の高緯度で傾圧変換 ⇒加熱域から離れた下層の熱潮汐構造は、鉛直伝播だけでなく、 傾圧変換によって形成・維持される。

#### くまとめ>

非断熱加熱による鉛直伝播する重力波 + 順圧変換や傾圧変換で生じるロスビー波 刺汐波構造(太陽に固定された波動構造)

潮汐波の強制域(雲頂加熱域)では、 発散成分と回転成分の南北流が一致するように、 流線関数と速度ポテンシャルが足し合わさる。 ⇔太陽直下の加熱を効率よく、赤道から極に運ぶ 本研究では、雲層の加熱域から下層に伝播する熱潮汐波が、赤道域で減衰しながら地面に達するというシンプルな描像ではなく、

「太陽固定座標から見た定常加熱・冷却の3次元応答」という視点で以下のような特徴がみられた。

#### (1) 一日潮

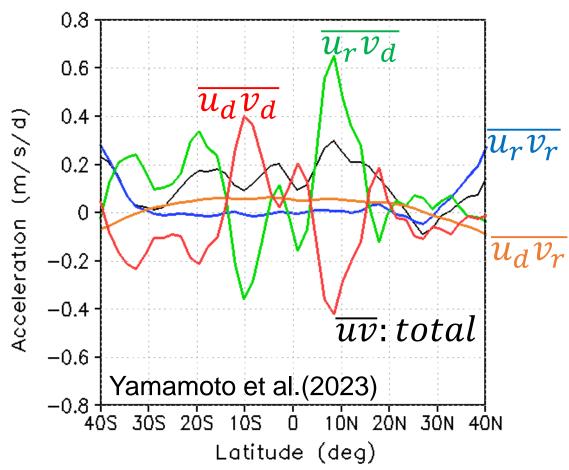
加熱域では松野一ギル応答のようなロスビー波と重力波の応答。 ロスビー波は回転成分の順圧変換で形成・維持され、赤道向き 運動量輸送に寄与する。

#### (2) 半日潮

加熱域では、重力波応答。 加熱域周辺では、発散成分による順圧変換も共存する。 加熱域から離れた雲底より下の高緯度域では、ロスビー波が回 転成分の傾圧変換で形成・維持される。

# 一日熱潮汐の水平運動量輸送(雲頂)

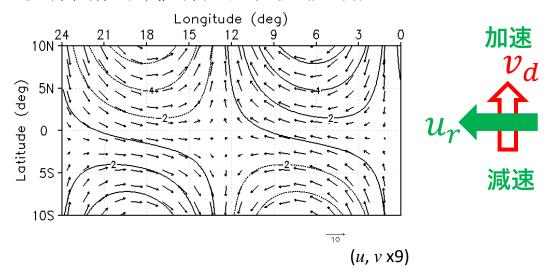
東西風加速(65km、太陽光加熱極大)



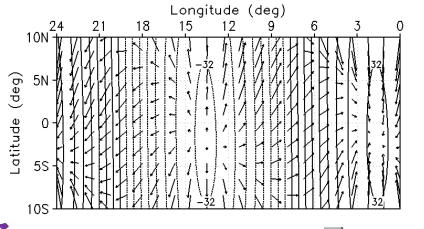
赤道で回転成分東西流 収束域が赤道の南

低緯度の加速機構 は赤道非対称になる

流線関数(等値線)&回転流(矢羽) 65km



速度ポ(等値線)&発散流(矢羽) 65km





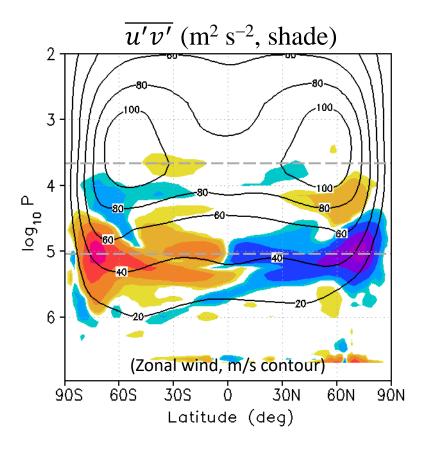
(u, v x9)

### **Eddy horizontal momentum fluxes**

15

-3

#### **Total waves**



すべての波による水平運動量輸送 における潮汐波の役割

雲頂の赤道向き運動量フラックス:潮汐波

雲底の赤道向き運動量フラックス:潮汐波

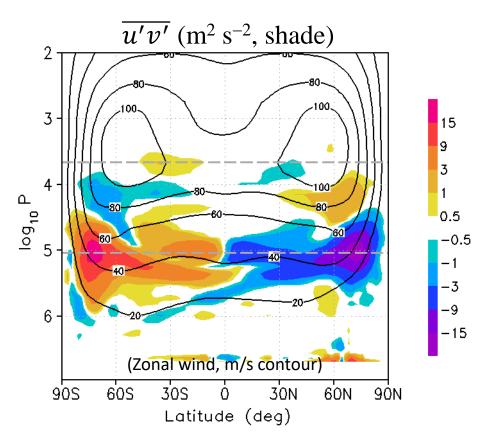
↓ 短周期擾乱 (前回の話)

X(p/101,325)

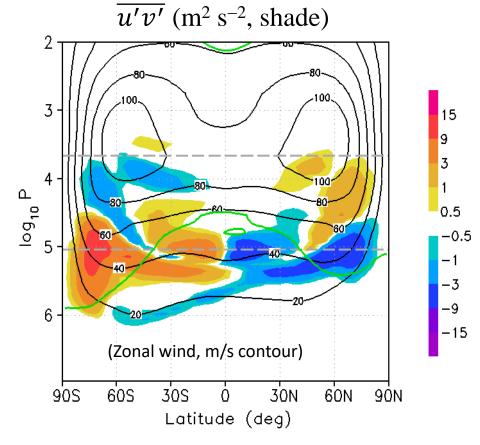
Yamamoto et al.(2023)

# **Eddy horizontal momentum fluxes**

#### **Total waves**



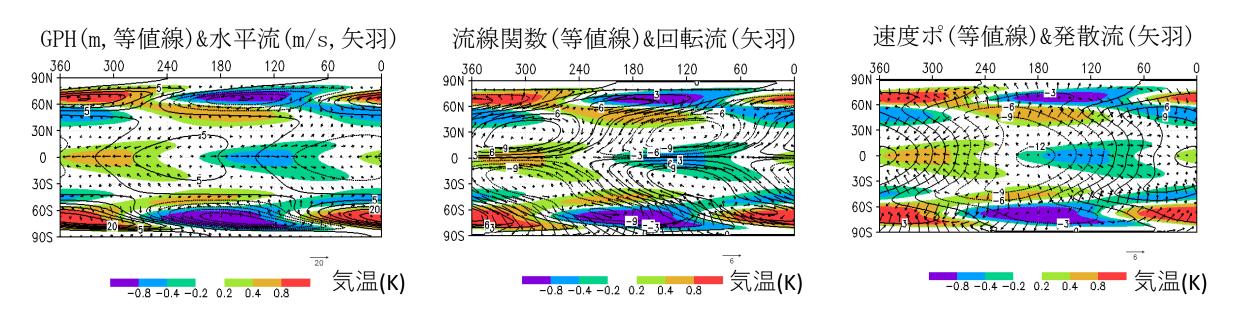
#### 7.5-day wave 主要な短周期擾乱



X(p/101,325) 中層および下層の雲域では、 7.5日波が運動量と熱を輸送する主要な短周期擾乱

### 7.5-day wave horizontal structures

7.5 day wave with zonal wavenumber 1 at  $1.07 \times 10^5$  Pa (~50 km)



臨界緯度を挟んで、高緯度Rossby波と赤道Kelvin-like波の構造は分離

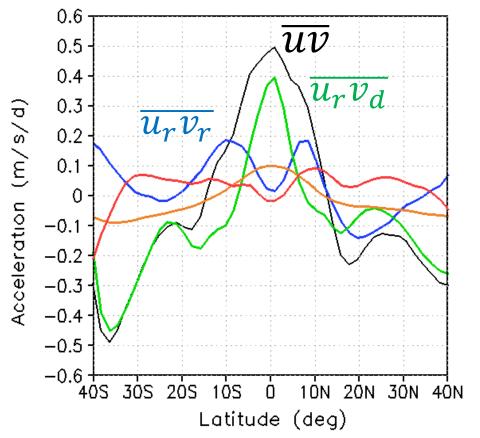
臨界緯度を横切る流線関数と速度ポテンシャル によりR波とK波は結合している

雲層下部のK波と雲層下部のR波は、臨界緯度を挟んで順圧エネルギー変換雲層下部のK波と上部雲層のR波は、臨界高度を挟んで傾圧エネルギー変換(Yamamoto et al. 2023)

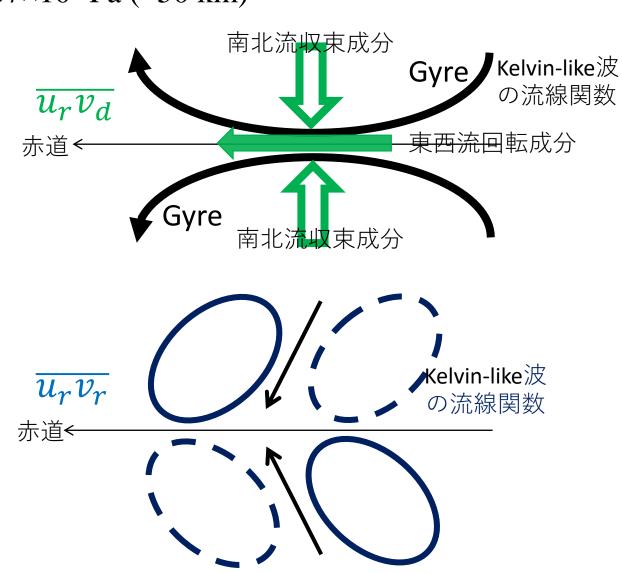
### 7.5日波の水平運動量輸送(雲底)

7.5 day wave with zonal wavenumber 1 at  $1.07 \times 10^5$  Pa (~50 km)

赤道Kelive-like波による超回転加速



Yamamoto et al.(2023)



#### くまとめ(赤道東西風加速:潮汐と短周期擾乱との比較)>

- ○雲頂では、潮汐波が、赤道帯状流加速における主要な擾乱
- 一日潮による赤道向き運動量フラックスよる赤道東西風加速(~0.2 m/s/d)
- ・収束・発散の南北流成分と回転の東西風成分の相関項(u<sub>r</sub>v<sub>d</sub>)
- ・収束・発散の位相の傾き(u<sub>d</sub>v<sub>d</sub>)
- →今日の話
- ○雲底では、潮汐波よりも短周期擾乱の寄与が大きい
- 7.5日波による赤道向き運動量フラックスよる赤道東西風加速(~0.4m/s/d)
- ・*赤道上では*、Kelvin-like波の流線関数よる東西風成分と 南北流の発散・収束の相関項(u<sub>r</sub>v<sub>d</sub>)
- ・*赤道周辺では、*Kelvin-like波の流線関数の傾き (uˌvˌ)
- → Yamamoto et al. (2023)